نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۵۶۷-۵۵۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 555-567

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی مدل‌سازی عددی و تحلیل هیدرولیکی دیوار آب‌بند سد خاکی

ابراهیم اسدی[۱]، توحید امیدپور علویان[۲]، مهدی سلطانی ستوبادی[۳]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

چکیده

سدهای خاکی به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی، نقش اساسی در مدیریت منابع آب، مهار سیلاب و تأمین آب کشاورزی و شرب دارند. چالش مهم در این سدها، کنترل نشت و فرسایش داخلی است که بر ایمنی و دوام آن‌ها اثر می‌گذارد. استفاده از دیوارهای آب‌بند با کاهش دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی، می‌تواند کارایی هیدرولیکی سد را بهبود بخشد. این پژوهش به بررسی اثر عمق (۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ متر) و ضخامت (۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۲ متر) دیواره آب‌بند بر روی دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار براساس مشخصات محاصره یکی از سد های خاکی آذربایجان شرقی با استفاده از مدل‌سازی عددی (Seep/w و GeoStudio) می‌پردازد. نتایج نشان داد که افزایش عمق دیواره تا ۱۵ متر، دبی نشتی را به میزان ۵۳/۴ درصد کاهش می‌دهد، درحالی‌که افزایش ضخامت تا ۲ متر، کاهشی معادل ۳۳/۷۱ درصد دارد. افزایش بیشتر عمق و ضخامت، اثر قابل‌توجهی در کاهش نشت ندارد. بهینه‌سازی ابعاد دیواره آب‌بند منجر به کاهش ۵۱/۲۱ درصد در گرادیان هیدرولیکی با عمق ۱۵ متر و کاهش ۲۲/۳۳ درصد با ضخامت ۲ متر می‌شود. همچنین، نیروی زیر فشار با افزایش عمق و ضخامت به ترتیب ۴/۴۴ درصد و ۳/۸۱ درصد افزایش می‌یابد که با توجه به وزن بدنه سد، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر پایداری ندارد. تحلیل اقتصادی نشان داد که با بهینه‌سازی ابعاد دیواره، می‌توان ۵۳ درصد در هزینه‌های حفاری، ۳۳درصد در هزینه‌های اضافی صرفه‌جویی کرد و ۴۵ میلیارد ریال در اجرای سد خاکی مورد مطالعه صرفه‌جویی نمود. این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب بهینه عمق ۱۵ متر و ضخامت ۲ متر، ضمن کاهش مؤثر نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی، به کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل هیدرولیکی، دیوار آب‌بند، سد خاکی، گرادیان هیدرولیکی

مقدمه

سدها به‌عنوان سازه‌های حیاتی در مدیریت منابع آبی، نقش اساسی در کنترل سیلاب‌ها، تأمین آب شرب و کشاورزی، و تولید انرژی ایفا می‌کنند. در میان انواع مختلف سدها، سدهای خاکی به دلیل هزینه‌های ساخت پایین، سازگاری با شرایط زمین‌شناسی متنوع و سهولت در اجرا، به‌ویژه در مناطق با منابع محدود، از محبوبیت و کاربرد بالایی برخوردارند. بااین‌حال، یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و بهره‌برداری از این سدها، نشت آب از بدنه و پی آن‌ها است. نشت کنترل‌نشده می‌تواند به کاهش عمر مفید سد، افزایش خطر پدیده فرسایش داخلی، کاهش استحکام سازه‌ای و حتی تخریب کامل سد منجر شود. بنابراین، کنترل و کاهش میزان نشت از سدهای خاکی، به‌ویژه در بسترهای آبرفتی، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای مدیریت نشت در سدهای خاکی، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از روش‌های رایج و مؤثر شامل استفاده از دیوار آب‌بند است. دیوار آب‌بند که معمولاً از بتن پلاستیک، خاک سیمانی یا ورقه‌های فلزی ساخته می‌شود، به‌صورت یک مانع عمودی در داخل پی سد تعبیه‌شده و از حرکت مستقیم آب در زیر سد جلوگیری می‌کند. این دیوارها به دلیل قابلیت‌های ساختاری و عملکردی خود، می‌توانند در شرایط مختلف به‌عنوان یک گزینه مناسب برای کاهش نشت آب عمل کنند. مقایسه عددی عملکرد دیوار آب‌بند در مشخصات هیدرولیکی پی سد می‌تواند به درک بهتری از تأثیر این روش بر رفتار هیدرولیکی سدها کمک کند. این مقایسه می‌تواند شامل بررسی پارامترهایی مانند دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی برکنش باشد که هر یک از این پارامترها تأثیر مستقیمی بر پایداری و کارایی سد دارند. استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارهای تخصصی مانند Seep/w و GeoStudio به‌عنوان ابزاری کارآمد، امکان تحلیل دقیق تأثیر عوامل مختلف ازجمله ضخامت و عمق دیوار آب‌بند را فراهم

۱- استادیار دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - گروه مهندسی عمران، تبریز، ایران
۲- دانشجوی دکترای، مهندسی عمران -آب و سازه‌های هیدرولیکی-دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران -آب و سازه‌های هیدرولیکی- دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mahdi.soltanisotobadi@azaruniv.ac.ir)

می‌آورد. این نرم‌افزارها با شبیه‌سازی جریان آب و توزیع فشار در سازه، می‌توانند به مهندسان در انتخاب بهینه روش‌های آب‌بندی کمک کنند و تأثیرات هیدرولیکی این روش بر روی پی سد را به‌صورت کمی و کیفی بررسی نمایند. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌سازی می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف روش دیوار آب‌بند کمک کند و در نهایت به بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های آب‌بندی در سدهای خاکی منجر شود. این تحقیقات می‌توانند به‌عنوان مبنای علمی برای تصمیم‌گیری‌های مهندسی در این حوزه مورداستفاده قرار گیرند و به ارتقاء ایمنی و کارایی سدها کمک نمایند. با توجه به اهمیت کنترل نشت در حفظ عمر مفید سدها و جلوگیری از عواقب ناگوار، این نوع مطالعات از ارزش بالایی برخوردار است و می‌تواند به توسعه روش‌های نوین در طراحی و ساخت سدهای خاکی منجر شود. در نهایت، شناخت دقیق‌تر از رفتار هیدرولیکی و تأثیرات ناشی از انتخاب روش‌های مختلف آب‌بندی، می‌تواند به کاهش ریسک‌های مرتبط با نشت و بهبود عملکرد کلی سدها کمک کند، که این امر به‌نوبه خود به تأمین پایدار منابع آبی و افزایش امنیت سازه‌های آبی در برابر چالش‌های طبیعی و انسانی می‌انجامد.

بررسی عددی عملکرد دیوارهای آب‌بند در مشخصات هیدرولیکی پی سدهای خاکی یکی از موضوعات کلیدی در مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی است که به دلیل تأثیر مستقیم بر ایمنی و کارایی سدها مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات متعدد با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، اثر پارامترهای هندسی و مصالح دیوارهای آب‌بند را بر کنترل نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار بررسی کرده‌اند تا راهکارهایی برای بهینه‌سازی طراحی سدهای خاکی ارائه دهند. در سال (۱۹۵۵)، بررسی‌ها نشان داد که استفاده از لایه‌های نفوذناپذیر با نفوذپذیری کمتر از 10^{-8} متر بر ثانیه می‌تواند دبی نشت را تا ۶۰ درصد کاهش دهد و با افزایش طول مسیر جریان، از فرسایش داخلی جلوگیری کند. این مطالعه بر اهمیت انتخاب مصالح مناسب برای کاهش نشت تأکید داشت (Tinkham, 1955). در سال ۱۹۶۷، تحلیل‌های عددی و تجربی نشان داد که دیوارهای آب‌بند بتنی با ضخامت ۱ متر و عمق نفوذ تا ۷۰درصد ارتفاع پی آبرفتی، دبی نشت را تا ۴۵ درصد و گرادیان هیدرولیکی خروجی را به کمتر از ۰.۸ کاهش می‌دهند، که برای جلوگیری از جوشش ماسه حیاتی است (Bishop, 1967). در سال ۱۹۸۰، تحقیقات نشان داد که ترکیب دیوار آب‌بند بتنی با ضخامت ۱/۵ متر و تزریق سیمان با فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال، دبی نشت را تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد و پایداری پی را در برابر فرسایش داخلی بهبود می‌بخشد (Kraus, 1980). در سال ۱۹۹۸، مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار PLAXIS نشان داد که دیوارهای آب‌بند با افزایش طول مسیر نشت تا ۲ برابر، دبی نشت را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهند. دیوارهای ساخته‌شده از بتن پلاستیک با مدول الاستیسیته 10^{4} مگاپاسکال، گرادیان هیدرولیکی را در خاک‌های با نفوذپذیری بالا ($k > 10^{-5}$ متر بر ثانیه) تا ۳۰درصد کاهش می‌دهند (Cho et al., 1998). در سال ۲۰۰۵، بررسی‌های تجربی و عددی نشان داد که افزایش ضخامت دیوار آب‌بند از ۰/۵ به ۲ متر، دبی نشت را تا ۴۰ درصد و نیروی زیر فشار را تا ۱۵درصد کاهش می‌دهد. ضخامت بهینه ۱/۵ تا ۲ متر برای خاک‌های با نفوذپذیری متوسط ($k \approx 10^{-6}$) متر بر ثانیه پیشنهاد شد (Suzuki etal., 2005). در سال ۲۰۱۰، شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار Seep/w نشان داد که دیوارهای آب‌بند با عمق ۱۲ تا ۱۵ متر، فشار منفذی را تا ۲۵ درصدکاهش می‌دهند و از جوشش ماسه در پی سد جلوگیری می‌کنند. افزایش عمق تا ۸۰ درصد عمق پی، تأثیر بیشتری نسبت به ضخامت دارد (Lee et al., 2010). در سال ۲۰۱۲، تحلیل‌ها نشان داد که دیوارهای آب‌بند با ضخامت ۲ متر در مقایسه با ۱ متر، دبی نشت را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهند، اما هزینه‌های اجرایی را تا ۲۰درصد افزایش می‌دهند. این مطالعه بر ضرورت تعادل بین عملکرد و هزینه تأکید کرد (Morris et al., 2012). در سال ۲۰۱۸، بررسی جامع عملکرد دیوارهای آب‌بند در شرایط هیدرولیکی مختلف نشان داد که دیوارهای با عمق ۱۵ متر و ضخامت ۲ متر، دبی نشت را تا ۵۵ درصد و گرادیان هیدرولیکی را تا ۴۰ درصد در خاک‌های با نفوذپذیری 10^{-6} تا 10^{-5} متر بر ثانیه کاهش می‌دهند (Sharifi et al., 2018). در سال ۲۰۱۹، تحقیقات نشان داد که افزایش ۱۰ درصدی رطوبت خاک ناشی از بارندگی‌های شدید، دبی نشت را تا ۱۵درصد افزایش می‌دهد. این امر نیاز به دیوارهای آب‌بند با عمق تا ۲۰ متر را در مناطق مستعد تغییرات اقلیمی برجسته می‌کند (Garcia et al., 2019). در سال ۲۰۲۰، مدل‌سازی عددی نشان داد که افزایش عمق دیوار آب‌بند از ۱۰ به ۱۵ متر، دبی نشت را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. استفاده از بتن پلاستیک با نفوذپذیری 10^{-8} متر بر ثانیه، نسبت به خاک سیمانی، ۱۰درصد کاهش بیشتر در نشت ایجاد می‌کند (Wang et al., 2020). مطالعات اخیر (Amini 2020 et al.,) نشان داد که دیوارهای آب‌بند با عمق مناسب در سد سبلان، نیروی زیر فشار را تا ۳۰ درصد کاهش داده و گرادیان هیدرولیکی را در پی سد به‌طور مؤثری کنترل کرده است. همچنین، بررسی پیکربندی‌های مختلف دیوارهای آب‌بند دوگانه (Jafari et al., 2020) نشان داد که فاصله بهینه بین دیوارها می‌تواند گرادیان هیدرولیکی را تا ۴۵ درصد کاهش دهد. علاوه بر این، تحلیل‌های (Hosseini et al., 2021) نشان داد که افزایش عمق دیوار آب‌بند تا ۷۵ درصد عمق پی، نیروی زیر فشار را به‌طور مؤثری کنترل می‌کند. در سال ۲۰۲۱، بررسی‌ها نشان داد که ترکیب دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر و تزریق دوغاب با فشار ۱۵۰ کیلوپاسکال، دبی نشت را تا ۶۵ درصد کاهش می‌دهد و پایداری سد را در برابر بارهای هیدرولیکی شدید بهبود می‌بخشد (Kim et al., 2021). در سال ۲۰۲۴، تحلیل جریان نشت و گرادیان هیدرولیکی در سد خاکی علویان نشان داد که

دیوار آب‌بند با عمق ۱۴ متر و ضخامت ۱/۵ متر، دبی نشت را تا ۴۸ درصد و گرادیان هیدرولیکی را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. این مطالعه بر اهمیت کالیبراسیون مدل‌های عددی با داده‌های میدانی تأکید کرد (Kouhdaragh et al., 2024). نیروی برکنش به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در پایداری سدهای خاکی مطرح است، زیرا می‌تواند با افزایش فشار هیدرواستاتیکی در زیر پی، خطر جوشش ماسه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. در سد خاکی قیصرق، شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که افزایش عمق دیوار آب‌بند تا ۱۵ متر منجر به افزایش ۴۴/۴ درصد نیروی برکنش (معادل ۱۵۰ کیلوپاسکال) می‌شود. این افزایش، به دلیل وزن بالای بدنه سد (۱/۲ میلیون تن) و شیب‌های مناسب (۱:۳)، اثر منفی قابل‌توجهی بر پایداری سد نداشته و در عین حال از وقوع جوشش ماسه جلوگیری می‌کند.

هدف این پژوهش، بررسی و تحلیل تأثیر دیوار آب‌بند بر کاهش نشت و بهبود پایداری هیدرولیکی سدهای خاکی با استفاده از مدل‌سازی عددی است. در این راستا، با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای Seep/w و GeoStudio، اثر پارامترهای کلیدی نظیر عمق و ضخامت دیوار آب‌بند، دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی بر عملکرد سد مورد مطالعه، یعنی سد خاکی قیصرق، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طور خاص، این مطالعه به بررسی اثر عمق (۹ ، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ متر) و ضخامت (۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۲ متر) دیوار آب‌بند بر دبی نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سد قیصرق می‌پردازد.

نوآوری این مطالعه در ارائه تحلیل جامع اقتصادی و هیدرولیکی برای بهینه‌سازی ابعاد دیوار آب‌بند نهفته است که منجر به صرفه‌جویی ۴۵ میلیارد ریالی و کاهش ۵۳/۴ درصد دبی نشت شد، در حالی که پایداری سد حفظ گردید. بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی، ضخامت ۲ متر برای دیوار آب‌بند به‌عنوان مقدار بهینه پیشنهاد شد. این ضخامت دبی نشت را ۳۳/۷۱ درصد و گرادیان هیدرولیکی را ۲۲/۳۳ درصد کاهش داد. همچنین، افزایش ضخامت به ۲/۲ متر تنها ۰/۵ درصد کاهش اضافی در دبی نشت ایجاد کرد که از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. این انتخاب در عین حفظ پایداری، هزینه‌های اجرایی را ۳۳ درصد کاهش داد. این پژوهش به‌طور جامع به بررسی ابعاد دیوار آب‌بند پرداخته و نتایج آن می‌تواند به عنوان مرجع مناسبی برای طراحان و مهندسان در پروژه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد و به بهینه‌سازی عملکرد سدهای خاکی و کاهش نشت، به‌ویژه در شرایط هیدرولیکی خاص کمک کند.

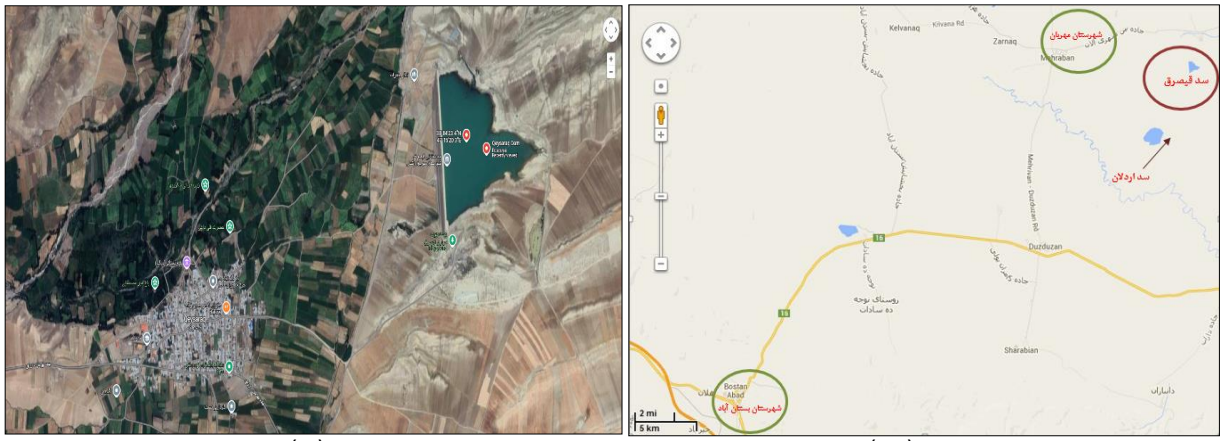
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای بررسی کارایی دیوار آب‌بند در کاهش نشت و کنترل فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه، از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/w بهره گرفته شده است. مدل‌سازی با در نظر گرفتن شرایط هیدروژئولوژیکی و مشخصات ژئوتکنیکی منطقه، شامل داده‌های میدانی و اطلاعات آزمایشگاهی بر روی نفوذپذیری مواد مختلف نیز بوده و تحلیل نشت در محیط‌های اشباع و غیراشباع را شامل می‌شود. در مدل‌سازی عددی با استفاده از Seep/w، جریان غیراشباع در لایه‌های آبرفتی پی سد با استفاده از منحنی‌های مشخصه خاک (Soil-Water Characteristic Curves) شبیه‌سازی شد. این تحلیل نشان داد که در شرایط غیراشباع، نفوذپذیری خاک تا (10^{-8}) متر بر ثانیه کاهش می‌یابد که تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش نشت دارد. به‌منظور دقت بالاتر در تحلیل، شرایط مرزی واقعی و هندسه دقیق سد در مدل اعمال شده است.

مشخصات هندسی و نفوذپذیری

سد خاکی قیصرق در استان آذربایجان شرقی، در بالادست روستای قیصرق واقع شده است. این سد دارای مختصات جغرافیایی "۱۲ ‘۱۵ °۴۷ طول شرقی و "۲۱ ‘۴ °۳۸ عرض شمالی بوده و در فاصله ۶۱ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بستان‌آباد و ۱۰/۳ کیلومتری شرق شهرستان مهربان قرار دارد. این موقعیت مکانی، سد را در معرض تأثیرات هیدرولوژیکی منطقه‌ای قرار داده که در طراحی سیستم کنترل نشت باید مدنظر قرار گیرد.

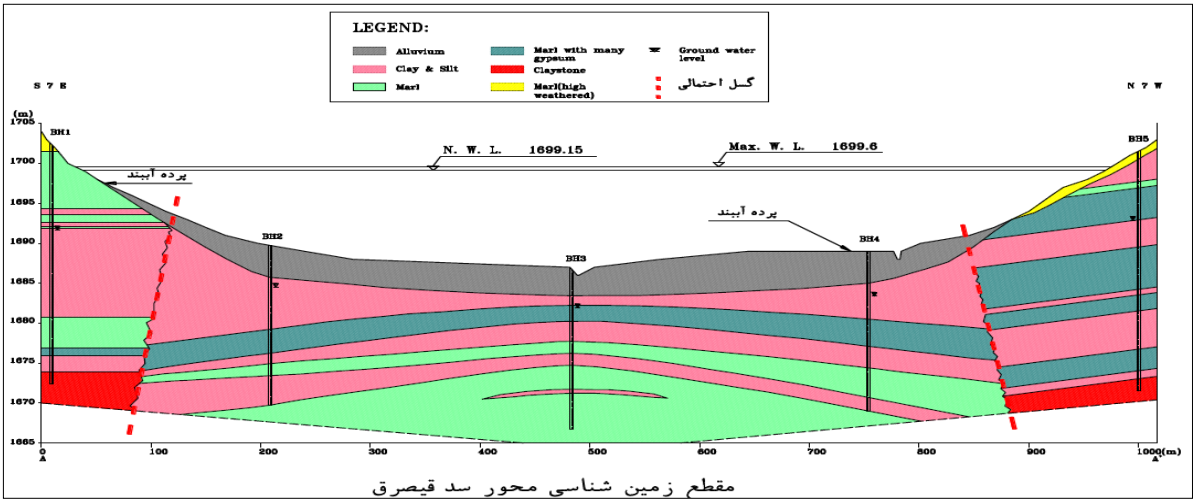
شکل ۱: (الف) موقعیت جغرافیایی سد قیصرق، (ب و ج) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد قیصرق نمای ماهواره‌ای سد قیصرق را نمایش می‌دهد که موقعیت مخزن، سازه اصلی سد و اراضی پیرامونی (شامل زمین‌های کشاورزی) را نشان می‌دهد. بررسی این تصویر در ارزیابی شرایط توپوگرافی، کاربری اراضی و نحوه توزیع منابع آبی مؤثر بوده و می‌تواند به تحلیل رفتار هیدرولیکی سد کمک کند. سد قیصرق برای آبیاری ۱۲۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی بالادست طراحی شده است. محصولات اصلی شامل گندم (۶۰ درصد)، جو (۳۰ درصد)، و یونجه (۱۰ درصد) هستند. شکل ۲: پروفیل زمین‌شناسی طولی محور سد قیصرق، که لایه‌بندی زمین‌شناسی شامل رس، ماسه و آبرفت، و سطح آب زیرزمینی را با مقیاس دقیق نشان می‌دهد، به تحلیل نفوذپذیری و پایداری هیدرولیکی سد کمک می‌کند. مشخصات هندسی سد قیصرق و ویژگی‌های نفوذپذیری در جداول ۱ و ۲ ارائه‌شده است. برای تعیین پارامترهای نفوذپذیری از آزمایش‌های نفوذپذیری استاندارد استفاده‌شده است که در زیر توضیح داده‌شده است:



(ب) (الف)

(ج)

شکل ۱- (الف)- موقعیت جغرافیایی سد قیصرق، (ب و ج) تصویر ماهواره‌ای از موقعیت سد قیصرق



شکل ۲- پروفیل زمین‌شناسی طولی محور سد مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات هندسی سد مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
ارتفاع سد	۱۶ متر
طول تاج	۹۸۸ متر
عرض تاج	۶ متر
شیب بالادست	۱:۳
شیب پایین‌دست	۱:۳
رقوم تاج	۱۷۰۱ متر

جدول ۲- نفوذپذیری مصالح پی و بدنه سد مورد مطالعه

نام مصالح	مقدار نفوذپذیری قائم(m/s)	مقدار نفوذپذیری افقی(m/s)
هسته رسی	۱×۱۰^{-۹}	۱×۱۰^{-۸}
فیلتر ریزدانه	۱×۱۰^{-۳}	۵×۱۰^{-۳}
فیلتر درشت‌دانه و زهکش	۱×۱۰^{-۲}	۵×۱۰^{-۲}
پوسته خاکی	۵×۱۰^{-۵}	۱×۱۰^{-۴}
لایه آبرفتی سطحی	۱×۱۰^{-۶}	۵×۱۰^{-۶}
لایه سیلت و رسی	۱×۱۰^{-۷}	۵×۱۰^{-۷}
دیوار آب‌بند کات‌آف	۱×۱۰^{-۹}	۱×۱۰^{-۹}

مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio و ماژول Seep/w انجام شده است. این نرم‌افزار که مبتنی بر روش اجزای محدود است، قابلیت تحلیل دقیق فرآیند تراوش در محیط‌های متخلخل را فراهم می‌کند. در این مدل‌سازی، داده‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی سد مورد مطالعه به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند. شرایط مرزی شامل سطح آب مخزن در بالادست، سطح آب خروجی در پایین‌دست و ویژگی‌های نفوذپذیری مصالح مختلف سد است. گسترش مرزهای سمت راست و چپ مدل عددی به ۵۰ متر در هر طرف سد تعیین شد تا تأثیر شرایط مرزی بر نتایج شبیه‌سازی به حداقل برسد. این مقدار بر اساس استانداردهای مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار GeoStudio و تحلیل‌های حساسیت اولیه انتخاب شد. تحلیل‌های حساسیت نشان داد که افزایش مرزها به ۷۰ یا ۹۰ متر، تغییر ناچیزی (کمتر از ۲ درصد) در دبی نشتی و گرادیان هیدرولیکی ایجاد می‌کند، در حالی‌که زمان محاسبات را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. بنابراین، ۵۰ متر به‌عنوان مقدار بهینه برای گسترش مرزها انتخاب شد. برای ایجاد مدل دقیق، هندسه سد مورد مطالعه و شرایط هیدرولیکی منطقه در نظر گرفته شده و مدل توسعه‌یافته است تا نتایج شبیه‌سازی انطباق بالایی با رفتار واقعی سد داشته باشد. مدل‌های عددی شامل سناریوهای مختلف، با تأکید بر تغییرات در عمق و ضخامت دیوار آب‌بند، طراحی شده‌اند. این مدل‌ها امکان مقایسه نتایج و تحلیل عملکرد روش‌های مختلف آب‌بندی را فراهم کرده و مبنایی برای بهینه‌سازی طراحی سیستم کنترل نشت سدهای خاکی ارائه می‌دهند.

نرم‌افزار GEO STUDIO

نرم‌افزار GeoStudio، توسعه‌یافته توسط شرکت Geoslope کانادا، به‌عنوان ابزاری پیشرفته و جامع در مهندسی ژئوتکنیک شناخته می‌شود. این نرم‌افزار با ماژول‌های تخصصی خود، به مهندسان امکان می‌دهد که پدیده‌های ژئوتکنیکی را با استفاده از مدل‌های رفتاری و روش‌های تحلیلی مختلف به‌طور دقیق بررسی کنند. با محیط گرافیکی کاربر پسند، GeoStudio فرآیند مدل‌سازی و طراحی را تسهیل می‌کند و به کاربران اجازه می‌دهد قبل از اجرای پروژه، مدل‌ها را ارزیابی کنند. قابلیت‌های نرم‌افزار شامل تحلیل‌های تنش-کرنش، ارزیابی تراوش، بررسی پایداری شیروانی‌ها و تحلیل‌های دینامیکی است. درمجموع، GeoStudio به‌عنوان ابزاری چندمنظوره، دقت و کارایی پروژه‌های مهندسی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و به مهندسان این امکان را می‌دهد که با اطمینان بیشتری به طراحی و تحلیل پروژه‌های خود بپردازند (Zienkiewicz, 1971).

پارامترهای مدل و متغیرهای بررسی‌شده

در این پژوهش، تأثیر عمق و ضخامت دیوار آب‌بند و نفوذپذیری لایه‌های آبرفتی پی سد بر میزان نشت و فشار آب منفذی در سد خاکی مورد مطالعه بررسی شده است. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Seep/w انجام شد و دیوار آب‌بند با عمق و ضخامت‌های مختلف طراحی گردید. نتایج حاصل از هر یک از طراحی‌ها بررسی و

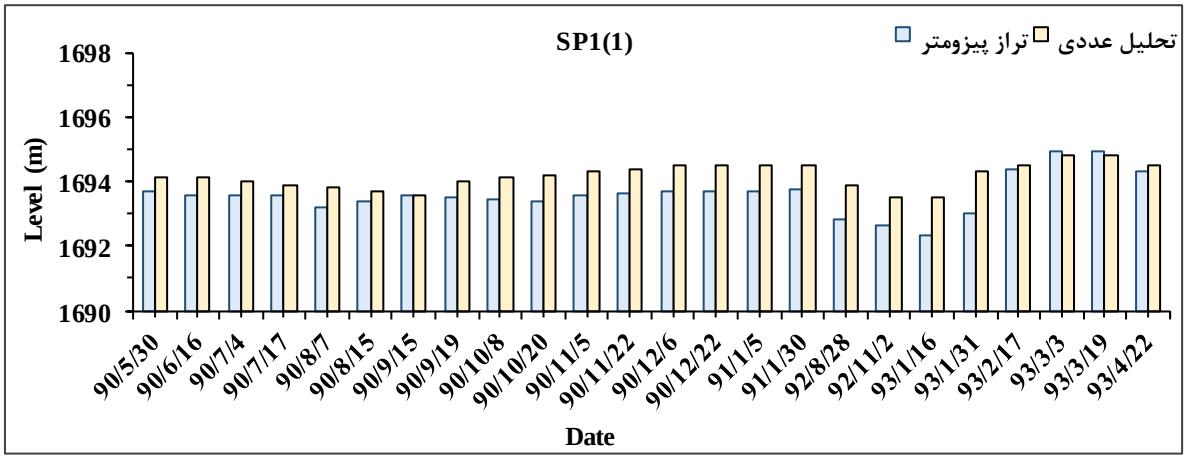
نمودارهای مربوطه ترسیم شد. جدول (۳) مشخصات مدل‌های طراحی شده را نشان می‌دهد. برای ارزیابی هزینه‌های اجرایی، داده‌های مربوط به برآورد هزینه‌های حفاری، حمل مصالح و اجرای دیوار آب‌بند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر و ضخامت ۲ متر بهترین عملکرد را در کاهش نشت ارائه داده و هزینه‌های اجرایی را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. این یافته‌ها بیانگر اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای طراحی در افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های پروژه‌های سدسازی است.

جدول ۳- مشخصات متغیرهای مدل‌های به کار رفته در شبیه‌سازی

ردیف	متغیرها	مرتبه تغییر
۱	عمق دیواره آب‌بند	۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۶ متر
۲	ضخامت دیواره آب‌بند	۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۲ متر
۳	نوع سد	۱ حالت

صحت سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با Seep/w

برای اطمینان از دقت مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از تحلیل عددی با داده‌های میدانی پیزومترهای نصب‌شده در سد مورد مطالعه مقایسه شد. شکل ۳ مقایسه‌ای میان هد آب محاسبه‌شده در نرم‌افزار و داده‌های ثبت‌شده در پیزومتر SP(1) را نشان می‌دهد. تطابق قابل‌قبول بین داده‌های مدل و داده‌های واقعی، دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند. مقایسه هد آب محاسبه‌شده با داده‌های پیزومتر SP(1) نشان داد که خطای مدل کمتر از ۵ درصد است. برای تطابق بهتر، نفوذپذیری خاک‌های آبرفتی در مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (آزمایش نفوذپذیری استاندارد (ASTM D5084)) تنظیم شد که منجر به انطباق ۹۵درصد با داده‌های میدانی شد.



شکل ۳- مقایسه هد کل از نتایج تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در پیزومتر SP 1(1)

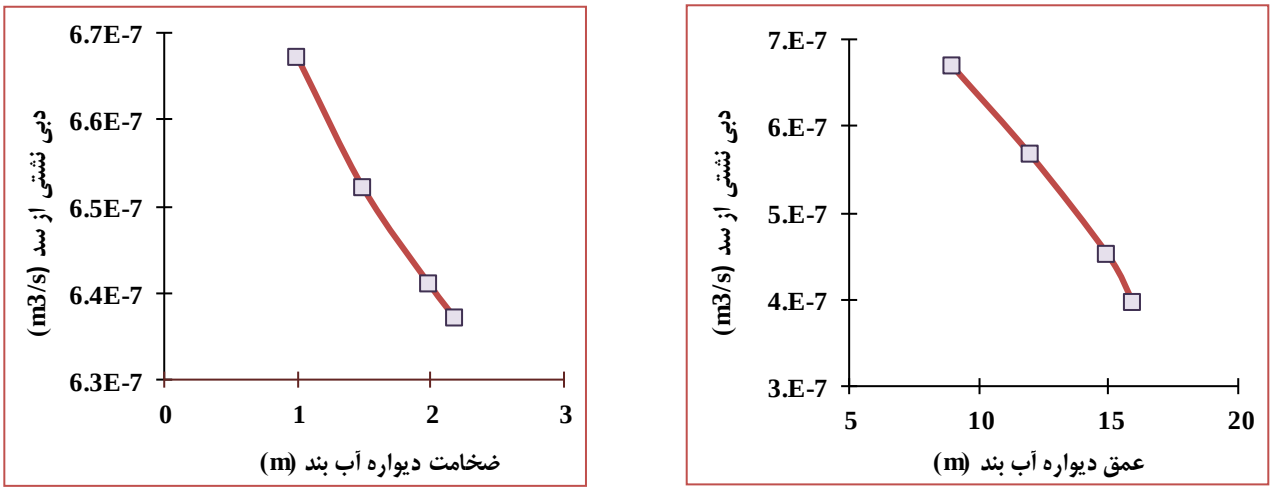
نتایج و بحث

تحلیل عملکرد دیوار آب‌بند در کاهش نشت، کنترل فشار آب منفذی و گرادیان هیدرولیکی

نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که عمق دیوار آب‌بند تأثیر قابل‌توجه‌تری نسبت به ضخامت آن در کاهش دبی نشت ایفا می‌کند. به‌طوری‌که افزایش عمق دیوار آب‌بند از ۹ متر به ۱۵ متر منجر به کاهش ۵۳/۴ درصد در دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه به ازای هر متر طول سد) گردید، درحالی‌که افزایش ضخامت از ۱/۵ متر به ۲ متر تنها کاهش ۳۳/۷۱ درصد را در دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه به ازای هر متر طول سد) را نشان داد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمق‌های بیشتر از ۱۵ متر تأثیر قابل توجهی در کاهش نشت ندارند و دبی نشت تقریباً ثابت باقی می ماند. این نتیجه حاکی از این است که طراحی دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر به‌عنوان یک مقدار بهینه، می‌تواند عملکرد هیدرولیکی را بهبود بخشد و از هزینه‌های اجرایی غیرضروری جلوگیری نماید. در ارتباط با گرادیان هیدرولیکی، نتایج نشان داد که دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر می‌تواند گرادیان هیدرولیکی خروجی را به مقدار ۵۱/۲۱ درصد کاهش دهد، درحالی‌که افزایش ضخامت به ۲ متر این پارامتر را ۲۲/۳۳ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، بررسی اثر

عمق و ضخامت بر نیروی زیر فشار نشان داد که افزایش عمق به ۱۵ متر، نیروی زیر فشار را ۴/۴۴ درصد و افزایش ضخامت به ۲ متر این نیرو را ۳/۸۱ درصد افزایش می‌دهد. این تغییرات به دلیل وزن بالای بدنه سد (۱/۲ میلیون تن) و طراحی مناسب شیب‌ها، تأثیر محدودی بر پایداری سد دارند. این نیرو در مقایسه با نیروی مقاوم بدنه سد (حدود ۸۵ درصد کل نیروها) ناچیز است و به دلیل کنترل مؤثر نیروی زیر فشار توسط ساختار سد، خطر جوشش ماسه را ایجاد نمی‌کند و اثر منفی قابل‌توجهی بر پایداری سد ندارد.

شکل (۴) به‌وضوح تأثیر عمق و ضخامت دیواره آب‌بند بر دبی نشتی را نشان می‌دهد. نمودار (الف) تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر دبی نشتی نشان می‌دهد و نشان‌دهنده کاهش ۵۳/۴ درصد در دبی نشت به ازای افزایش عمق به ۱۵ متر است. در نمودار (ب) تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند نیز نشان می‌دهد که افزایش ضخامت تا ۲ متر منجر به کاهش ۳۳/۷۱ درصد در دبی نشتی می‌شود، اما پس‌ازاین افزایش، تأثیر محسوسی بر کاهش نشت مشاهده نمی‌شود. این تحلیل با در نظر گرفتن عمق ثابت ۱۵ متر انجام شده و تأثیر تغییرات ضخامت دیوار آب بند بر دبی نشت را در این شرایط نشان می‌دهد.

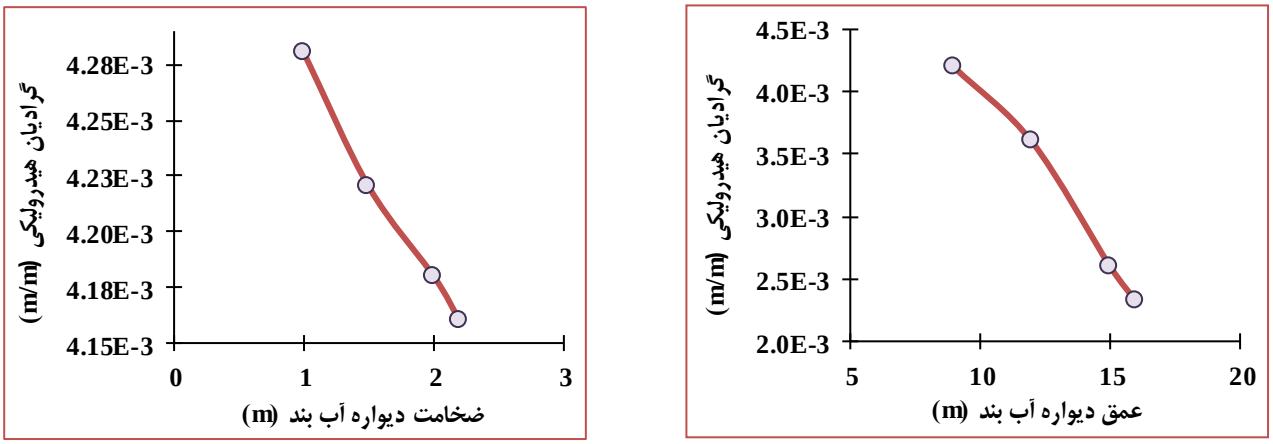


(الف) (ب)

شکل ٤- (الف): تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر دبی نشتی در سد مورد مطالعه، (ب): تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر دبی نشتی در سد مورد مطالعه

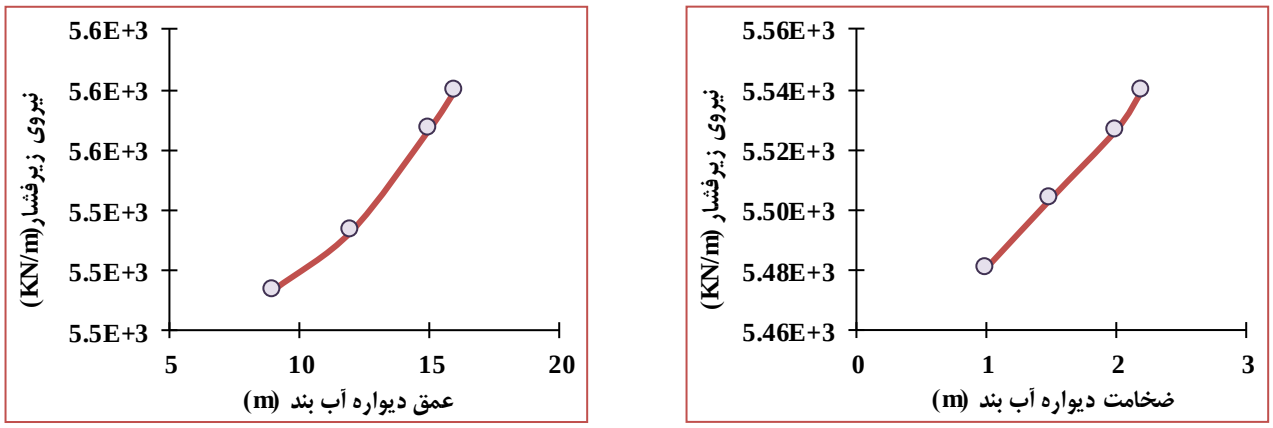
شکل (۵): این شکل شامل دو بخش است. (الف) تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه. گرادیان هیدرولیکی در ناحیه خروجی پی سد (پایین‌دست دیوار آب‌بند) بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش عمق دیوار تا ۱۵ متر، گرادیان را ۵۱/۲۱ درصد کاهش می‌دهد، اما پس‌ازاین عمق، تغییر قابل‌توجهی در کاهش گرادیان مشاهده نمی‌شود. همچنین، افزایش ضخامت دیواره تا ۲ متر، گرادیان هیدرولیکی را ۳۳/۷۱ درصد کاهش می‌دهد و پس‌ازاین مقدار، تغییر محسوسی در کاهش گرادیان دیده نمی‌شود. این تغییرات گرادیان هیدرولیکی به بهبود پایداری هیدرولیکی سد کمک کرده است.

شکل ۶ شامل دو نمودار است. (الف) تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار در سد مورد مطالعه، (ب) تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار در سد مورد مطالعه. نمودار (الف) نشان می‌دهد که افزایش عمق دیواره آب‌بند تا ۱۵ متر، نیروی زیر فشار را ۵۱/۲۱ درصد کاهش می‌دهد، اما پس‌ازاین عمق، تغییر قابل‌توجهی در کاهش نیروی زیر فشار مشاهده نمی‌شود. با این‌حال، این افزایش عمق به ۱۵ متر، نیروی زیر فشار را به ۱۵۰ کیلوپاسکال افزایش داد که معادل ۴/۴۴ درصد افزایش است. نمودار (ب) بیانگر آن است که افزایش ضخامت دیواره آب‌بند تا ۲ متر، نیروی زیر فشار را ۳۳/۷۱ درصد کاهش می‌دهد و پس‌ازاین مقدار، تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. پدیده جوشش ماسه (Piping) به گرادیان هیدرولیکی وابسته است و دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر، گرادیان هیدرولیکی را ۵۱/۲۱ درصدکاهش داد که خطر جوشش ماسه را به حداقل رساند (Terzaghi, 1943). نیروی زیر فشار، هرچند افزایش یافت، به دلیل وزن بدنه سد کنترل شد و اجرای دیوار آب‌بند با عمق ۱۵ متر، نقش مهمی در بهبود پایداری سد و جلوگیری از پدیده جوشش ماسه ماسه ایفا کرد.



(الف) (ب)

شکل ۵- (الف): تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه، (ب): تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر گرادیان هیدرولیکی در سد مورد مطالعه

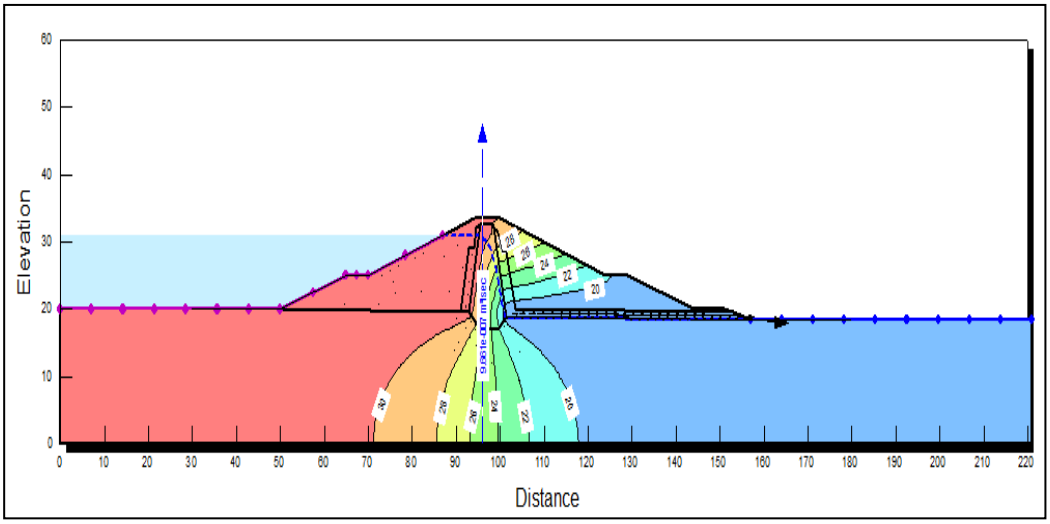


(الف) (ب)

شکل ٦- (الف): تأثیر تغییرات عمق دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه، (ب): تأثیر تغییرات ضخامت دیواره آب‌بند بر نیروی زیر فشار بر سد مورد مطالعه

بررسی‌های بیشتر نشان داد که افزایش عمق دیوار آب‌بند از ۱۵ متر به ۱۶ متر و افزایش ضخامت از ۲ متر به ۲/۲ متر، تأثیر معناداری بر کاهش نشت، نیروی زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی نداشته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد ابعاد دیوار آب‌بند، نه‌تنها تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود عملکرد هیدرولیکی ندارد، بلکه هزینه‌های اجرایی را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین، انتخاب یک مقدار بهینه برای عمق دیوار آب‌بند (حدود ۱۵ متر) می‌تواند عملکرد هیدرولیکی سد را بهبود بخشد و از افزایش غیرضروری هزینه‌ها جلوگیری کند. نتایج آنالیز نرم‌افزارهای Seep/w و GeoStudio برای مقطع سد خاکی مورد مطالعه با ارتفاع بالادست ۳۱ متر برابر است با مجموع عرض پی سد و تراز نرمال سد که همان ۱۱ متر می‌باشد که در نرم‌افزار Seep/w بر این اساس مدل‌سازی شده است.

دیواره آب‌بند به طول ۱۵ متر و ضخامت ۱ متر در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل‌ها شامل منحنی‌های هم‌پتانسیل، خط فریاتیک نشت و دبی نشتی از سد هستند. بررسی این داده‌ها نشان می‌دهد که تمرکز خطوط هم‌فشار کل در هسته سد خاکی، به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش انرژی آب می‌گردد. به‌ویژه در ناحیه اتصال هسته به دیواره آب‌بند، شرایط مشابهی مشاهده می‌شود که به‌طور مؤثری مانع نشت آب از بدنه و پی سد خاکی مورد مطالعه می‌گردد.



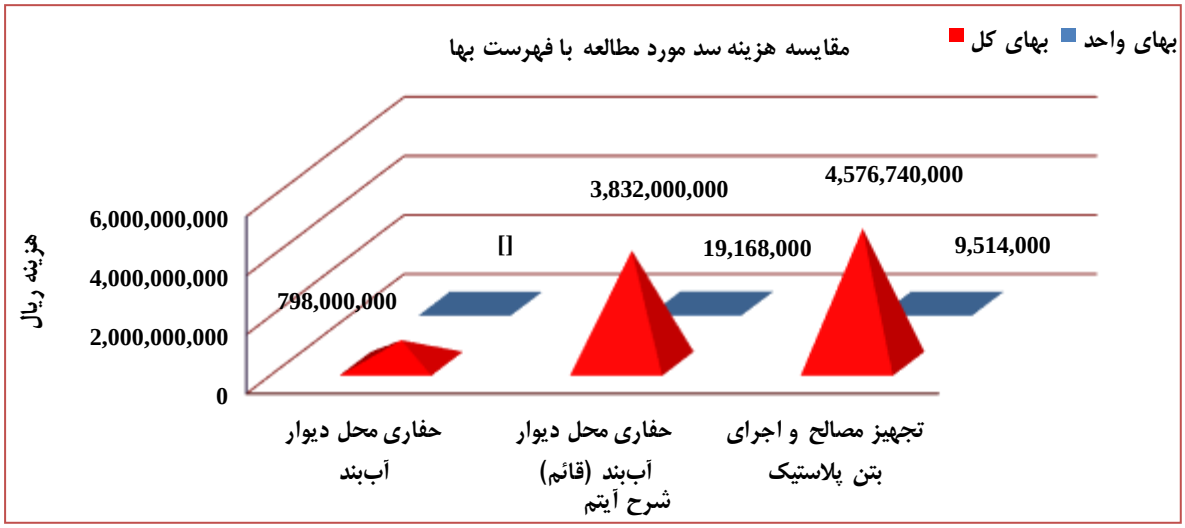
شکل ۷- سد مورد مطالعه با بیشترین عمق مخزن (بار آبی بالادست ۳۱ متری)

تحلیل هزینه‌های اجرایی و بهینه‌سازی اقتصادی

بررسی هزینه‌های اجرایی سد مورد مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب صحیح ابعاد هندسی دیوار آب‌بند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش هزینه‌های کلی پروژه دارد. مطابق جدول (۴)، هزینه‌های اجرایی این روش شامل هزینه‌های حفاری، حمل مصالح و اجرای بتن پلاستیک برای دیوار آب‌بند است. بهینه‌سازی ابعاد دیوار آب‌بند، به‌ویژه تغییرات در عمق و ضخامت آن، منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌ها و بهبود عملکرد هیدرولیکی سد شده است. نمودار ستونی هزینه‌های اجرایی دیوار آب‌بند در شکل (۸) نمایش داده‌شده است. بر اساس داده‌های ارائه‌شده، هزینه اجرای دیوار آب‌بند عمدتاً به عمق و ضخامت آن وابسته است. تغییرات در عمق دیوار آب‌بند باعث کاهش ۵۳ درصد در دبی نشت و کاهش قابل توجه هزینه های حفاری و اجرای بتن پلاستیک شده است. همچنین، افزایش ضخامت دیوار آب‌بند تا ۲ متر، کاهش ۳۳ درصد در هزینه‌های اضافی را به همراه داشته است. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در جدول (۴)، هزینه حفاری محل دیوار آب‌بند به‌طور قائم برای دیوارهای به عمق ۷ متر و حمل مواد حاصله تا فاصله ۵۰۰ متر، برابر با ۱۱/۹۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب تعیین‌شده است. مشخصات این بخش از پروژه شامل طول دیوار آب‌بند ۹۳ متر، عرض ۵/۱ متر و ضخامت ۵/۱ متر است که حجم کل حفاری را به ۱۳۵/۷۱ مترمکعب می‌رساند و در محاسبات هزینه‌ها لحاظ شده است، و بهای کل آن برای سد مورد مطالعه ۸۳/۸۷۵/۹۸۵/۰۰۰ ریال برآورد شده است. هزینه‌ها بر اساس فهرست‌بهای سال ۱۴۰۳ محاسبه شدند. در مرحله بعد، هزینه تهیه و اجرای هسته رسی و پلاستیک، با بهای واحد ۱۱/۰۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب در فهرست‌بها ثبت‌شده است. حجم کل این بخش ۷۱/۱۳۵ مترمکعب بوده و هزینه نهایی آن برای سد مورد مطالعه ۷۸/۴۵۵/۱۰۰/۰۰۰ ریال برآورد شده است. این کاهش نسبی بهای واحد به دلیل استفاده از تجهیزات پیشرفته‌تر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر در اجرای عملیات حفاری و بتن‌ریزی حاصل شده است. جمع کل هزینه اجرای دیوار آب‌بند در این پروژه ۸۵/۲۷۱/۱۹۵/۰۰۰ ریال برآورد شده است که در مقایسه با روش‌های مرسوم، کاهش قابل‌توجهی دارد. این کاهش هزینه عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی ابعاد هندسی دیوار آب‌بند و کاهش میزان حفاری و مصرف مصالح است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تنظیم صحیح پارامترهای طراحی، نه‌تنها موجب کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود، بلکه عملکرد هیدرولیکی سد را نیز بهبود بخشیده و به بهینه‌سازی اقتصادی پروژه‌های سدسازی کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارهای Seep/w و GeoStudio، به بررسی تأثیر عمق و ضخامت دیواره آب‌بند بر کنترل نشت، گرادیان هیدرولیکی و نیروی زیر فشار در سد خاکی مورد مطالعه پرداخته است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش عمق دیواره آب‌بند تأثیر چشمگیرتری نسبت به افزایش ضخامت آن دارد. به‌طور خاص، اجرای دیواره آب‌بند با عمق ۱۵ متر موجب کاهش ۵۳/۴ درصدی در دبی نشتی شد، درحالی‌که افزایش ضخامت آن به ۲ متر تنها ۳۳/۷۱ درصد از نشت را کاهش داد. همچنین، افزایش عمق به ۱۶ متر و ضخامت به ۲/۲۰ متر تغییر محسوسی در نشت ایجاد نکرد که این خود نشان‌دهنده بهینگی مقادیر ۱۵ متر برای عمق و ۲ متر برای ضخامت دیواره آب‌بند است.



شکل ۸- نمودار ستونی برآورد هزینه دیوار آب‌بند سد مورد مطالعه

جدول ٤- فهرست هزینه‌های اجرایی دیوار آب‌بند

ردیف	شماره آیتیم	شرح آیتیم	واحد	طول	عرض	ضخامت	مقدار	بهای واحد	بهای کل
۱	۰۴۳۲۰۵	حفاری محل دیوار آب-بند به‌طور قائم برای دیوارهای به عمق ۷ متر و حمل مواد حاصله تا فاصله ۵۰۰ متر	مترمکعب	۴۰۰	۱	۷	۲۸۰۰	۲۸۵۰۰۰۰	۷۹۸۰۰۰۰۰۰
۲	۰۴۳۲۰۱	حفاری محل دیوار آب-بند به‌طور قائم برای دیوارهای با عمق بیش از ۷ متر تا ۲۰ متر و حمل مواد حاصل تا فاصله‌ی ۵۰۰ متر	مترمکعب	۴۰۰	۱	۵	۲۰۰۰	۱۹۱۶۸۰۰۰	۳۸۳۳۶۰۰۰۰۰۰
۳	۰۴۳۲۰۱	تهیه مصالح و اجرای بتن پلاستیک دیوار آب‌بند	مترمکعب	۴۰۰	۱	۱۲	۴۸۰۰	۹۵۱۴۰۰۰	۴۵۶۶۷۲۰۰۰۰۰
برآورد کل هزینه اجرای دیوار آب‌بند (ریال)									۹۱۹۸۳۲۰۰۰۰۰

علاوه بر این، دیواره آب‌بند با عمق ۱۵ متر ۵۱/۲۱ درصد گرادیان هیدرولیکی خروجی را کاهش داد، درحالی‌که افزایش ضخامت به ۲ متر تنها ۲۲/۳۳ درصد این پارامتر را کاهش داده است. بررسی نیروی زیر فشار نیز نشان داد که افزایش عمق به ۱۵ متر این نیرو را ۴/۴۴ درصد افزایش می‌دهد، درحالی‌که افزایش ضخامت به ۲ متر تنها افزایش ۳/۸۱ درصدی را به همراه داشت که تأثیر محدودی بر پایداری سد دارد. پایداری سد خاکی در برابر لغزش شیروانی و جوشش ماسه پی بررسی شد. دیوار آب‌بند با کاهش گرادیان هیدرولیکی، خطر جوشش ماسه را کاهش داد و وزن بدنه سد، پایداری در برابر لغزش را تضمین کرد. از بعد اقتصادی، بهینه‌سازی ابعاد دیواره آب‌بند منجر به کاهش ۵۳ درصدی در هزینه‌های حفاری، ۳۳ درصدی در هزینه‌های اضافی و صرفه‌جویی ۴۵ میلیارد ریالی در اجرای پروژه سد خاکی شده است. همچنین، این بهینه‌سازی باعث کاهش ۵۳/۴ درصدی دبی نشت نسبت به حالت بدون دیوار آب‌بند شده است، به‌طوری‌که دبی نشت از ۰/۰۲ مترمکعب بر ثانیه به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته است. برآورد فهرست‌بهای سال ۱۴۰۳ نیز نشان داد که هزینه حفاری دیواره آب‌بند و اجرای بتن پلاستیک در حالت بهینه، نسبت به روش‌های معمول به‌طور چشمگیری

کاهش‌یافته است. درنهایت، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد عمق و ضخامت دیواره آب‌بند تأثیر محسوسی بر عملکرد سد ندارد و صرفاً هزینه‌های اجرایی را افزایش می‌دهد. در مقابل، انتخاب مقادیر بهینه ۱۵ متر برای عمق و ۲ متر برای ضخامت در دیواره آب‌بند، ضمن کاهش نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی، منجر به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری پروژه شده است.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش که نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه عمق و ضخامت دیوار آب‌بند بر کاهش نشت و بهبود عملکرد هیدرولیکی سدهای خاکی است، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی به موارد زیر توجه شود:

۱- بررسی تأثیر ترکیب دیوار آب‌بند با سایر روش‌های کنترل نشت، مانند تزریق دوغاب یا استفاده از ژئوممبران‌ها، به‌منظور دستیابی به کارایی بالاتر و کاهش هزینه‌های اجرایی

۲- مطالعه اثر تغییرات اقلیمی و افزایش رطوبت خاک ناشی از بارندگی‌های شدید بر عملکرد دیوارهای آب‌بند در درازمدت، با تأکید بر مناطق با شرایط هیدرولوژیکی متغیر

۳- توسعه مدل‌های عددی پیشرفته‌تر با در نظر گرفتن اثرات دینامیکی بارهای زلزله بر پایداری دیوارهای آب‌بند و پی سدهای خاکی

۴- انجام تحلیل‌های حساسیت برای بررسی تأثیر تغییرات نفوذپذیری مصالح دیوار آب‌بند (مانند بتن پلاستیک یا خاک سیمانی) در شرایط مختلف ژئوتکنیکی

۵- ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از مصالح بازیافتی یا نوین در ساخت دیوارهای آب‌بند به‌منظور کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی پروژه‌های سدسازی

این تحقیقات می‌توانند به بهبود طراحی دیوارهای آب‌بند، افزایش پایداری سدهای خاکی و بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه‌های مشابه کمک کنند.

REFERENCES

Amini, A. and Rahimi, H. 2020. Uplift pressure and hydraulic gradient in Sabalan Dam. Applied Water Science. 10(111): 1–12. https://doi.org/10.1007/s13201-020-01195-2

Bishop, R. E. D. 1967. The effect of impermeable layers on the control of leakage in dams. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. 93(SM2): 143–158. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000932

Cho, W., Lee, S., & Kim, H. 1998. Performance comparison of cutoff walls in reducing leakage. Hydraulic Engineering. 124(1): 1–7. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:1(1)

Hosseini, S. M. and Mohammadi, M. 2021. Investigation of the effect of depth and distance between cutoff walls on uplift force for gravity dams. International Journal of Environmental Science and Technology. 18: 1361–1378. https://doi.org/10.1007/s13762-020-02867-x

Garcia, E. A. and Alencar, A. S. 2019. Impact of climate change on the performance of sealing systems in dams. Water Resources Management. 33(6): 2001–2015. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02245-4

Jafari, M. and Sohrabi, M. 2020. Investigation of the effect of the different configurations of double-cutoff walls beneath hydraulic structures on uplift forces and exit hydraulic gradients. Journal of Hydrology. 586: 124858. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124858

Kim, J. and Kim, H. 2021. Optimization of hydraulic performance of dam foundations using combined cutoff wall methods. Journal of Hydraulic Engineering. 147(4): 04021004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001840

Kouhdaragh, M., Majedi Asl, M., Omidpour Alavian, T., Nobahari, N. and Ayami Lord, M. 2024. Analysis of seepage flow and hydraulic gradient in the body and foundation of Alavian earth dam. Journal of Water and Soil Science. 28(4): 177–192. https://doi.org/10.47176/jwss.28.4.177

Kraus, H. 1980. Application of cutoff walls in earth dams. Geotechnical Engineering Journal, 6(3), 25–34.

Lee, S., Cho, W. and Kim, H. 2010. The effect of cutoff walls on pressure distribution in dam foundations. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. 136(5): 589–596. https://doi.org/10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0000260

Morris, H. J. and Wang, H. 2012. Impact of cutoff wall thickness on hydraulic parameters of dam foundations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 138(5): 589–596. https://doi.org/10.1061/(ASCE) GT.1943-5606.0000615

Sharifi, S. and Moghaddam, M. 2018. Comparative study of cutoff wall performance under various hydraulic conditions. Dams and Reservoirs. 28(2): 123–135. https://doi.org/10.1680/jdare.18.00024

Suzuki, T. and Saito, A. 2005. Experimental and numerical studies on the effect of cutoff wall thickness on leakage characteristics. Journal of Hydraulic Engineering. 131(8): 653–659. https://doi.org/10.1061/(ASCE) 0733-9429(2005)131:8(653)

Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons.

Tinkham, R. S. 1955. The effect of impervious layers on leakage control in dams. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 81(1): 1–14.

Wang, Y., & Zhang, L. 2020. Numerical analysis of

parameters affecting cutoff wall performance. Journal of Hydraulic Engineering, 146(2), 04019073. https://doi.org/10.1061/(ASCE) HY.1943-7900.0001702

Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. 1971. The finite element method: Volume 1: The basis. McGraw-Hill. London: McGraw-Hill. (p. 123)

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 555-567

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۵۶۷-۵۵۵

Numerical Modeling and Hydraulic Analysis of the Cutoff Wall in Earth Fill Dams

E. Asadi[1], T. Omidpour Alavian[2], M. Soltani Sotobadi[3]*

Recived: Apr.15, 2025 Accepted: Jun.18, 2025

Abstract

Earth dams, as critical infrastructure, play a vital role in water resource management, flood control, and supplying water for agricultural and domestic use. A key challenge in these structures is controlling seepage and internal erosion, which significantly impact their safety and durability. The use of cutoff walls can enhance hydraulic performance by reducing seepage flow and hydraulic gradient. This study investigates the effects of cutoff wall depth (9, 12, 15, and 16 meters) and thickness (1, 1.5, 2, and 2.2 meters) on seepage flow, hydraulic gradient, and uplift force, based on the specifications of an earth dam in East Azerbaijan, using numerical modeling (Seep/W and GeoStudio). The results indicate that increasing the cutoff wall depth to 15 meters reduces seepage flow by 53.4%, while increasing the thickness to 2 meters results in a 33.71% reduction. Further increases in depth and thickness have negligible effects on seepage reduction. Optimizing the cutoff wall dimensions leads to a 51.21% reduction in hydraulic gradient at a depth of 15 meters and a 22.33% reduction at a thickness of 2 meters. Additionally, uplift force increases by 4.44% and 3.81% with increasing depth and thickness, respectively, which has no significant adverse effect on dam stability due to the dam body's weight. Economic analysis reveals that optimizing cutoff wall dimensions can save 53% in excavation costs and 33% in additional expenses, resulting in savings of 45 billion IRR in the construction of the studied earth dam. This research demonstrates that selecting an optimal depth of 15 meters and thickness of 2 meters effectively reduces seepage, improves hydraulic performance, and lowers costs.

Keywords: Cutoff Wall, Earth Dam, Hydraulic Analysis, Hydraulic Gradient

1- Assistant Professor of Azerbaijan Shahid Madani University - Department of Civil Engineering, Tabriz, Iran
2- Ph.D. Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures, Maragheh University, Maragheh, Iran
3- Master's Student, Civil Engineering - Water and Hydraulic Structures of Azerbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: mahdi.soltanisotobadi@azaruniv.ac.ir)